

学校编码: 10384

学 号: 19920081152949

分类号____密级____

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

0Cr18Ni9 不锈钢高温断裂力学行为试验及 数值模拟研究

Experimental and Numerical Simulation Research on
High-temperature Fracture Behavior of 0Cr18Ni9 Stainless Steel

巩遵群

指导教师姓名: 陈立杰 副教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2011 年 06 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 06 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

0Cr18Ni9 不锈钢具有优良的力学性能以及耐蚀性、耐热性,广泛应用于石油化学工业、核反应堆等高温领域。目前国内对高温环境下 0Cr18Ni9 不锈钢疲劳、蠕变及蠕变-疲劳裂纹扩展等力学行为的研究还很缺乏。本文主要研究内容如下:

首先,开展了 0Cr18Ni9 不锈钢 550℃下简单拉伸、拉伸蠕变和裂纹扩展试验,其中裂纹扩展试验包括疲劳、蠕变和蠕变-疲劳裂纹的扩展试验。通过 0Cr18Ni9 不锈钢的拉伸蠕变试验发现:在 550℃下 240MPa-320Mpa 的应力水平范围内,0Cr18Ni9 不锈钢蠕变曲线具有明显的稳态蠕变阶段,稳态蠕变速率随着应力水平的升高而逐渐增大。裂纹扩展试验的结果表明:温度的升高加快了疲劳裂纹的扩展速率;保载时间的引入,也会加快疲劳裂纹的扩展速率。

其次,利用扫描电镜对裂纹扩展试样进行了显微断口分析,发现 0Cr18Ni9 不锈钢 550℃下疲劳裂纹扩展断口表面有明显的疲劳条带,裂纹扩展后期出现了典型的塑性断裂特征。550℃下蠕变裂纹扩展断口呈现韧窝与沿晶断裂的混合形貌,并且出现了二次裂纹。在 0Cr18Ni9 不锈钢蠕变-疲劳裂纹扩展前期,断口表面比较平整,有明显的疲劳条带,疲劳机制在裂纹扩展中起主导作用;而裂纹扩展后期,断口表面呈现疲劳条带和韧窝混合形貌,并且出现了晶界空洞。

最后,采用 ANSYS 软件分别进行了 0Cr18Ni9 不锈钢标准 CT 拉伸试样 550℃下蠕变、疲劳和蠕变-疲劳裂纹扩展的数值模拟。计算结果表明:蠕变裂纹扩展量的数值模拟结果与试验结果之间的最大误差小于 4%;裂纹尖端张开位移 (CTOD) 准则是比较合理的蠕变裂纹扩展准则。在疲劳和蠕变-疲劳裂纹扩展的数值模拟中,分别以能量释放率 G 准则、裂纹尖端张开位移 CTOD 准则作为裂纹扩展准则。疲劳裂纹扩展量的数值模拟结果与试验结果之间的最大误差为 8.06%,蠕变-疲劳裂纹扩展量的数值模拟结果和试验结果之间的最大误差为 5.05%。表明了本文数值模拟方法的正确性与合理性。

关键词: 0Cr18Ni9 不锈钢 高温 裂纹扩展 数值模拟

厦门大学博士论文摘要库

Abstract

Austenitic stainless steel 0Cr18Ni9 has excellent mechanical properties, corrosion resistance and heat resisting property. It is widely used in chemical industry, petroleum industry and nuclear power plant, etc. However, there are still relatively lack researches on high-temperature fracture behavior for 0Cr18Ni9. The contents of this paper are as follows:

Firstly, tension test, tensile creep curve tests and high-temperature fracture behavior tests are conducted for austenitic stainless steel 0Cr18Ni9 at 550°C. For high-temperature fracture behavior tests, standard CT specimens are used and the tests are performed under fatigue, creep, and creep-fatigue loading conditions. From creep curve test results, the creep curve of 0Cr18Ni9 at 550°C obviously has steady state creep stage at each stress level. For crack growth tests, the results show that the crack growth rate increases with the increasing temperature and the crack growth rate under creep-fatigue interaction is higher than the crack growth rate under fatigue loading.

Secondly, the analysis of fracture surface is carried out by scan electron microscope (SEM). For fatigue crack growth, the fatigue striations are obviously observed. In late stage of crack growth, the fractography shows a typical character of ductile fracture. For creep crack growth, the fractography is a mixed type with dimple and intergranular fracture, and secondary crack can be observed in late stage of creep crack growth. For creep-fatigue crack growth, fatigue striation can be observed obviously and fatigue mechanism plays a leading role in crack propagation in early stage of crack growth. But in late stage of crack growth, the fractography is a mixed mode of fatigue striation and dimple fracture.

Finally, using crack tip opening displacement (CTOD) as the criterion for crack extension, creep crack growth is simulated for 0Cr18Ni9 at 550°C by the finite element code ANSYS. The FEA result of propagation length is in good agreement with experimental data (relative error<4%). Using energy release rate (G) as the

criterion for crack extension, fatigue crack growth is simulated. Under fatigue loading, crack propagation length obtained by simulation agrees well with testing data. The maximum simulation error is about 8.06%. Using crack tip opening displacement (CTOD) as the criterion for crack extension, creep-fatigue crack growth for 0Cr18Ni9 at 550°C is simulated. For creep-fatigue, the maximum error of crack propagation length between the experimental data and numerical simulation results is about 5.05%.

Key Words: 0Cr18Ni9; high temperature; crack growth; numerical simulation

目 录

中文摘要	I
英文摘要	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 高温环境下裂纹扩展的国内外研究现状	2
1.3 金属材料裂纹扩展数值模拟的国内外研究现状	4
1.4 研究内容	5
第二章 高温环境裂纹扩展相关理论及其数值模拟方法	7
2.1 疲劳裂纹扩展	7
2.2 蠕变裂纹扩展	8
2.3 蠕变-疲劳裂纹扩展	10
2.4 金属材料裂纹扩展的数值模拟方法	12
2.4.1 裂纹扩展准则	12
2.4.2 有限元方法中的裂纹生成技术	14
2.4.3 裂纹扩展数值模拟采用的有限元软件	14
2.5 本章小结	15
第三章 高温疲劳、蠕变及蠕变-疲劳裂纹扩展试验研究	16
3.1 试样材料	16
3.2 疲劳裂纹扩展试验	16
3.2.1 试验试样与设备	16
3.2.2 试验结果及分析	18
3.2.3 疲劳裂纹扩展的断口分析	21
3.3 蠕变裂纹扩展试验	23
3.3.1 试样与试验方法	23

3.3.2 试验结果及分析·····	24
3.3.3 蠕变裂纹扩展的断口分析·····	26
3.4 蠕变-疲劳裂纹扩展试验·····	27
3.4.1 试样与试验方法·····	27
3.4.2 试验结果及分析·····	28
3.4.3 蠕变-疲劳裂纹扩展的断口分析·····	30
3.5 本章小结·····	31
第四章 蠕变裂纹扩展的数值模拟·····	32
4.1 蠕变模型及相关参数的拟合·····	32
4.2 有限元模型及网格划分·····	33
4.3 裂纹扩展数值模拟的流程·····	35
4.4 断裂力学参量 G 的计算方法·····	37
4.5 模拟结果及分析·····	38
4.6 本章小结·····	41
第五章 高温疲劳和蠕变-疲劳裂纹扩展的数值模拟·····	42
5.1 疲劳裂纹扩展的数值模拟·····	42
5.2 计算应变能释放率 G 的虚拟裂纹闭合法·····	44
5.3 疲劳裂纹扩展数值模拟的结果及分析·····	46
5.4 蠕变-疲劳裂纹扩展的数值模拟·····	47
5.5 蠕变-疲劳裂纹扩展数值模拟的结果及分析·····	49
5.6 本章小结·····	50
第六章 总结与展望·····	52
6.1 总结·····	52
6.2 展望·····	53
参考文献·····	54
致谢·····	60
攻读硕士学位期间发表的论文·····	61

Table of Contents

Chinese Abstract	I
English Abstract	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Value.....	1
1.2 Present Research Situation of Crack Growth under High Temperature at Home and Abroad.....	2
1.3 Present Research Situation of Crack Growth Simulation at Home and Abroad.....	4
1.4 The Research Content and Technical Route.....	5
Chapter 2 Related Theory and Numerical Simulation of High Temperature Crack Growth	7
2.1 Fatigue Crack Growth.....	7
2.2 Creep Crack Growth.....	8
2.3 Creep-Fatigue Crack Growth.....	10
2.4 Numerical Simulation Method of Crack Growth.....	12
2.4.1 Crack Growth Criterion.....	12
2.4.2 Crack Generation in Finite Element Analysis.....	14
2.4.3 Finite Element Software.....	14
2.5 Chapter Summary.....	15
Chapter 3 Fatigue, Creep, and Creep-Fatigue Crack Testing at 550℃	16
3.1 Specimen Materials.....	16
3.2 Fatigue Crack Propagation Testing.....	16

3.2.1 Test Specimen and Equipment·····	16
3.2.2 Testing Results and Analysis·····	18
3.2.3 Fracture Analysis of Fatigue Crack Growth·····	21
3.3 Creep Crack Propagation Testing·····	23
3.3.1 Test Specimen and Procedure·····	23
3.3.2 Testing Results and Analysis·····	24
3.3.3 Fracture Analysis of Creep Crack Growth·····	26
3.4 Fatigue-Creep Crack Propagation Testing·····	27
3.4.1 Test Specimen and Procedure·····	27
3.4.2 Testing Results and Analysis·····	28
3.4.3 Fracture Analysis of Creep-Fatigue Crack Growth·····	30
3.5 Chapter Summary·····	31
Chapter 4 Numerical Simulation of Creep Crack Growth·····	32
4.1 Creep Mode of 0Cr18Ni9 at 550℃·····	32
4.2 Finite Element Model·····	33
4.3 Program Flow of Creep Crack Growth Simulation·····	35
4.4 Computational Method for Crack Tip Parameters C^* ·····	37
4.5 Simulation Results·····	38
4.6 Chapter Summary·····	41
Chapter 5 Numerical Simulation of Fatigue and	
Creep-Fatigue Crack Growth under High Temperature·····	42
5.1 Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth·····	42
5.2 Virtual Crack-ClosureIntegral Method·····	44
5.3 Simulation Results of Fatigue Crack Growth·····	46
5.4 Numerical Simulation of Fatigue-Creep Crack Growth·····	47
5.5 Simulation Results of Creep-Fatigue Crack Growth·····	49
5.6 Chapter Summary·····	50
Chapter 6 Summary and Outlook·····	52
6.1 Summary·····	52

6.2 Outlook	53
References	54
Acknowledgements	60
Published Paper	61

厦门大学博士论文摘要库

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

在工业生产和日常生活中,飞机机身和船体的开裂,天然气和各种压力管道的裂纹扩展,铁轨的疲劳断裂,电子元件的断裂等事故和现象屡有发生。1982年,美国商业部所属的国家标准局和 Battelle Columbus 实验室向国会提交的一份调查报告中指出,美国每年因断裂和防止断裂而付出的代价大约 1190 亿美元^[1]。据我国劳动部统计,国内在 20 世纪 80 年代发生的锅炉和压力容器的爆炸事故约 5000 起,人员伤亡累计近万人。因此,开展断裂方面的研究,发展合理的失效分析和安全评定方法意义重大,将会有效降低由断裂造成的经济损失,显著减少事故的发生。

很多产品尤其是应用于航空工业的关键结构和材料,在实际工作过程中多承受交变载荷的反复作用,其失效模式大多为疲劳断裂。据统计,航空产品构件的断裂失效中大约 70%为疲劳断裂所致^[2]。航空发动机和燃气轮机中的涡轮叶片、涡轮盘在高温工作中,长期承受较大的离心应力,容易产生高温蠕变现象。同时涡轮叶片和涡轮盘,在飞机反复起飞-巡航-降落过程中,经受着交变载荷,而且还要经受气动负荷和各种振动负荷,所以也会不可避免的产生疲劳损伤。实际工作中,这些构件受力会更复杂,往往产生蠕变-疲劳交互作用。因此研究高温下疲劳、蠕变及蠕变-疲劳交互作用下的裂纹扩展,有助于为高温设备的设计提供可靠的理论基础。

工业生产中的设备、构件,由于工艺、制造技术等方面的原因,不可避免的会存在刀具划痕、异物夹杂等缺陷。这些缺陷或裂纹在疲劳、蠕变及蠕变-疲劳交互作用下会发生扩展,达到临界状态时将导致失稳扩展而失效。对于含缺陷(裂纹)的产品、构件的服役和处理,一方面可能过早的报废,造成极大的资源浪费,另一方面盲目无依据的使用就有可能存在很大的安全隐患。

因此,在工程应用中,对于高温下工作构件的设计,如果构件内存在裂纹或者类似裂纹的缺陷,就需要根据断裂力学的方法及工作寿命的要求,给出允许的

裂纹尺寸和允许的裂纹扩展速度。在确保产品安全可靠使用的基础上,使产品在经济上得到最大限度的利用。

数值模拟和理论、实验一样都是科学研究中的重要方法。在断裂力学研究裂纹扩展的过程中,必然要面对各种断裂参数的计算。然而由于实际问题中裂纹体几何构型以及所受载荷的复杂性,人们难以一一给出相应断裂参数的闭合解。随着计算机硬件和软件的发展,数值方法开始应用于断裂参数的计算。从数值分析的结果中提取相关信息并用来计算断裂参数,可以大大减少工作量。过去的几十年,数值方法取得了巨大的进步,人们先后开发出多种商业软件。商业软件的普遍应用,也使数值分析的目的从单一的结构分析逐渐转向整个结构或者一个发展过程的分析。高温下的裂纹扩展试验,由于试验条件限制,一般多针对小尺寸的试样,有的情况下又耗时比较长。因此,发展高温下裂纹扩展过程的数值模拟方法,能够部分取代复杂而又耗时的裂纹扩展试验,高效低耗地完成大量研究工作。

1.2 高温环境下裂纹扩展的国内外研究现状

高温环境下裂纹扩展规律的研究主要包括材料试验研究和裂纹扩展理论研究两个方面。

在试验研究方面,张芳等人^[3]进行了 2.25Cr1Mo 钢 200℃、420℃、500℃下的疲劳裂纹扩展试验,指出随着温度的升高,2.25Cr1Mo 钢的强度和延性下降,温度超过 420℃时,疲劳裂纹扩展速率明显增大。叶菁^[4]做了 2.25Cr1MoV 常温到 500℃温度区间内多个温度上的疲劳裂纹扩展试验,结果表明:随着温度的升高,2.25Cr1MoV 钢疲劳裂纹扩展速率逐渐增大,裂纹扩展方式由穿晶断裂为主向沿晶断裂为主转变。张萍等人^[5]通过对 16MnR 钢高温条件下的裂纹扩展试验,发现 16MnR 钢在温度超过 300℃时,随着温度的升高疲劳裂纹扩展速率增大。王莺等人^[6]进行了 316L 钢常温、200℃、400℃、550℃下的疲劳裂纹扩展试验,认为高温下氧化作用增强,导致裂纹尖端塑性降低,加速了疲劳裂纹扩展。

姜波^[7]进行了 GH33A 合金 600℃、650℃、700℃三种温度下了蠕变裂纹扩展行为研究,结果表明高温断裂力学参量 C^* 积分可以有效关联该合金的高温蠕变裂纹扩展速率。曹名洲^[8]进行了 GH37 镍基高温合金静载荷下的高温蠕变裂纹扩

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库